

# 铜冶炼转炉烟气收集系统的开发及应用

朱鹏春, 于海波\*, 何恩, 班卿, 赵思谷  
(云南铜业股份有限公司西南铜业分公司, 云南昆明 650102)

**[摘要]** 针对铜冶炼转炉吹炼摇炉、进料、放渣、溶剂加入过程低空逸散烟气收集难的问题,通过工艺特性分析和烟气流场模拟,开发出具有自抑结渣能力的新型密封小车,并匹配性对集烟系统进行优化设计,环集烟气中硫的捕集率提高约 81.8%,铜冶炼转炉吹炼工艺环保能力得到显著提升。

**[关键词]** 铜; 转炉吹炼; 烟气收集

**[中图分类号]** TF811; TF806 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 1003-8884(2023)03-0063-06

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2023.03.012

随着科技水平的不断提升和社会的快速发展,铜已成为我国重要的战略金属。2020年以来,我国精炼铜产量均突破 1 000 万 t<sup>[1]</sup>。目前,全球 80% 以上的铜采用火法冶炼方式<sup>[2]</sup>,其主要流程包括熔炼、吹炼、火法精炼和电解精炼<sup>[3]</sup>。其中,吹炼作为铜火法冶炼的关键中间环节,承担着冰铜除杂的任务。冰铜吹炼工艺包括转炉吹炼、闪速吹炼、顶吹吹炼等,转炉吹炼因其高效的脱杂能力和热效率,一直是冰铜吹炼的主流工艺,国内约 65% 以上铜产量采用转炉吹炼工艺<sup>[4]</sup>。

转炉吹炼工艺为间歇式生产工艺,吹炼过程需要频繁摇炉进料、放渣、倒铜、取样,吹炼造渣期需要频繁加熔剂,这些过程都伴随大量烟气逸散<sup>[5]</sup>。随着环保要求日趋严苛,低空烟气治理成为制约转炉吹炼工艺可持续发展的技术难题<sup>[6]</sup>。为了有效治理转炉低空烟气,新型连续吹炼转炉和集烟罩优化成为研究的重点<sup>[7-10]</sup>。

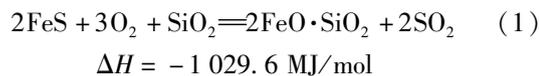
## 1 工艺分析

### 1.1 反应机理

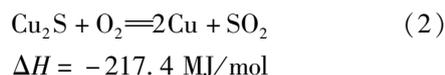
转炉吹炼是脱杂和脱硫的过程,由造渣期和

造铜期两个阶段组成,目的是将含铜 56% ~ 60% 的冰铜吹炼成含铜 99.8% 以上的粗铜,具体反应如式(1)~(2)所示。造渣期主要是将冰铜所含的 Fe、As、Sb、Zn、Bi 等杂质金属以渣的形式脱除,同时部分硫以二氧化硫烟气形式脱除;造铜期则主要是进一步氧化脱除剩余的硫。整个吹炼过程是自发的放热反应,需要间断式外加冷料实现热平衡。

造渣期主要反应式见式(1)。



造铜期主要反应见式(2)。



### 1.2 工艺流程

转炉吹炼属于间断式生产过程,具体工艺流程如图 1 所示。造渣期随着熔剂的不断加入,炉内渣层不断升高,为了确保吹炼顺畅,需要摇炉放渣,放渣结束后继续吹炼,造渣期经过反复的加溶剂-造渣-放渣直至除 Fe 结束得到品位约 75% 的白冰铜。造铜期随着反应的进行,需要不断的向炉内加入冷料,造铜期是一个重复摇炉加冷料的过程,直至造铜终点。吹炼过程产生的烟气经集烟系统进入制酸工序生产硫酸;产生的渣经冷却后送至选矿。

### 1.3 工艺特点

图 2 为铜冶炼转炉示意图,主要包括炉窑本体和集烟罩。炉窑只设炉口一个进出通道,吹炼过程

**[收稿日期]** 2023-01-20

**[第一作者]** 朱鹏春(1989—),男,云南玉溪人,工程师,硕士,主要从事铜火法冶炼工作。

**[通信作者]** 于海波(1987—),男,河北承德人,高级工程师,硕士,主要从事铜火法冶炼工作。

**[引用格式]** 朱鹏春,于海波,何恩,等.铜冶炼转炉烟气收集系统的开发及应用[J].有色设备,2023,37(3):63-68.

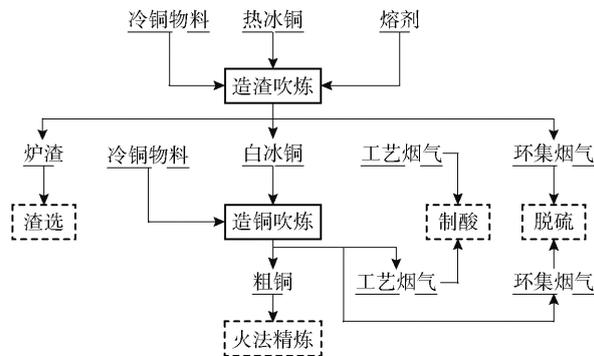


图1 转炉吹炼工艺流程图

中所有的物料进出只能通过炉口完成；集烟罩通常采用内、外两层烟罩方式。内层烟罩与主工艺烟道相连，收集吹炼过程的大部分烟气，同时，内层烟罩设置滑动密封小车，吹炼过程处于下限位状态，保证内层烟罩密封性；加料、放渣、出铜时密封小车将提至上限为，为作业过程提供足够的操作空间。外层烟罩与环保烟道相连，收集炉口逸散烟气，正常吹炼过程炉口处于 $0^\circ$ 位置，炉口完全处于内层烟罩内，烟气由内层烟罩收集；摇炉进、出物料和取样时，需将炉口转至 $60^\circ$ 以外位置，此过程炉口转出内层烟罩进入外层烟罩范围，由于供风系统联锁具有一定的动作时间，摇炉过程风眼移出熔体液面后才能停止送风，当风眼逐渐移出液面至炉口处于 $45^\circ$ 时，在风眼区高压风的作用下，炉口会伴随大量的熔体和烟气喷射。为了避免炉口喷溅物粘结影响内层烟罩上的密封小车正常运行，传统密封小车在摇炉过程中会随炉体的转动而向上开启，容易造成低空烟气逸散。此外，转炉采用钢包倒运进料方式，进料过程中由于集烟罩敞开，钢包、炉口会产生大量烟气逸散烟气；熔剂加入过程，加入口也会伴随烟气外逸。低空烟气难治理已成为目前铜冶炼转炉工艺存在的最大弊端。

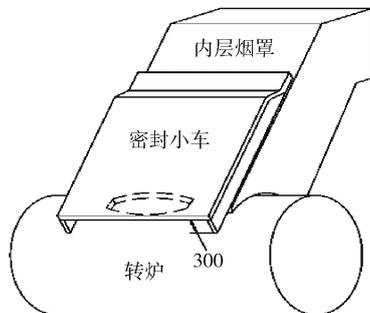


图2 铜冶炼转炉示意图

## 2 烟气分布规律研究

### 2.1 烟气量及成分分析

为了能够准确分析转炉吹炼过程烟气的分布规律，需要对吹炼所产生的烟气量和烟气成分进行分析。冰铜吹炼实际是氧化除铁和氧化脱硫的过程，冰铜中Fe和S的含量直接决定了吹炼的烟气量。根据生产实际，现有转炉冰铜理能力为900 t/h，冰铜中Fe、S的含量分别为24%、16%，通过冶金计算得到吹炼过程烟气量和组成成分，具体如表1所示。从表1中可看出，吹炼过程烟气量约 $30\,365\text{ Nm}^3/\text{h}$ ，其中 $\text{SO}_2$ 含量占20%以上，部分 $\text{SO}_2$ 过氧化导致烟气中含有约0.6%的 $\text{SO}_3$ 。

表1 转炉吹炼过程烟气量和组分

烟气成分	质量/kg	体积/ $\text{m}^3$	含量/%	烟气量/ ( $\text{Nm}^3/\text{h}$ )
$\text{SO}_2$	41 968	16 458	20.1	30 365
$\text{SO}_3$	1 753	491	0.6	
$\text{O}_2$	937	655	0.8	
$\text{N}_2$	71 522	61 657	75.3	
$\text{H}_2\text{O}$	2 030	2 538	3.1	

### 2.2 烟气流场数学模型建立

为了掌握吹炼各阶段烟气分布规律，结合实际生产工艺控制条件和转炉吹炼过程的工况，基于Navier-Stokes方程，求解流体的质量、动量和能量守恒，为了封闭方程，引入了湍流模型，预测流体湍流流动规律；为了提高模拟的准确度，压力和速度采用SIMPLE算法进行耦合，并将动量、湍动能、湍流耗散率、能量等方程采用二阶迎风方法进行修正，最终建立吹炼过程烟气流场数学模型，具体模型如图3所示。

### 2.3 吹炼过程烟气流场模拟

在送风量 $32\,000\text{ Nm}^3/\text{h}$ ，主工艺烟道负压 $-400\text{ Pa}$ ，环保烟道负压 $-100\text{ Pa}$ 条件下，对吹炼过程炉口处于 $0^\circ$ 位置时的烟气流场进行模拟，结果如图4所示。从图4中可以看出，正常吹炼状态下，由于炉口完全处于内层烟罩，烟罩密封性好，负压较高，烟气可通过内层集烟罩得到高效收集，外层烟罩基本无逸散烟气。此外，从图中还可以看出，炉口区域烟气浓度较高，且由于烟道负压衰减量大，烟气流动较为

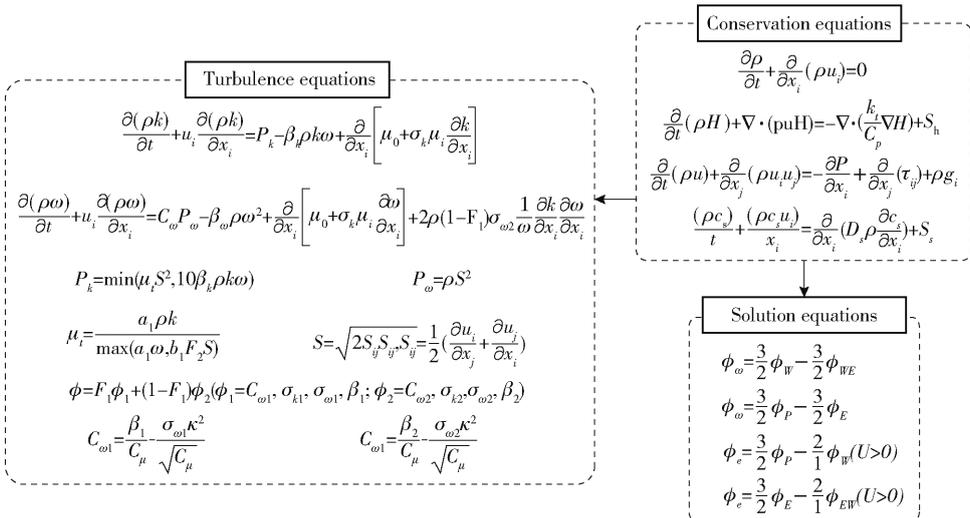


图3 转炉吹炼烟气流场数学模型示意图

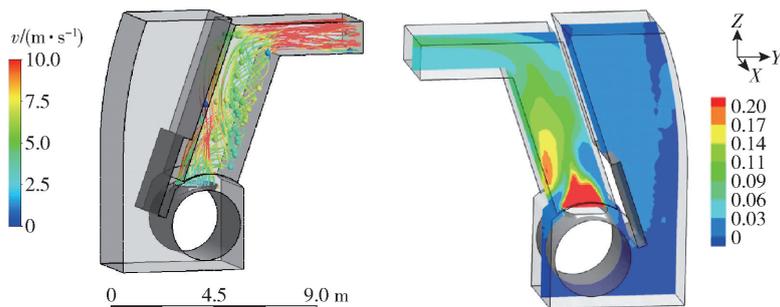


图4 炉口位于0°时的烟气流场

紊乱,整体流速也较低;随着烟气的上升,由于不断的均匀化,烟气浓度会逐渐降低,且靠近锅炉入口处烟道负压较高,烟气流速较高,整体流动较规律。

## 2.4 摇炉过程烟气流场模拟

在送风量  $32\,000\text{ Nm}^3/\text{h}$ ,主工艺烟道负压  $-400\text{ Pa}$ ,环保烟道负压  $-100\text{ Pa}$  条件下,摇炉过程炉口转至  $45^\circ$  位置时,对内层烟罩上的密封小车处于上限位(开启)和下限位(密闭)状态下的烟气流场进行模拟,结果如图5所示。由图5可以看出,转炉摇炉过程中,若内层烟罩密封小车处于上限位,当炉口转至  $45^\circ$  时,由于压缩风的作用,大量烟气会从内层烟罩逸散至外层烟罩,且逸散烟气流速明显大于内层烟罩内烟气的流速;若摇炉过程中内层烟罩密封小车处于下限位,由于内层烟罩保持良好的密闭性,炉口喷射出的烟气经密封小车阻止后,逸散至外层烟罩的烟气量大幅减少,烟气基本由内层烟罩,且逸散至外层烟罩的少量烟气流速明显减小,有利于外层烟罩对该部分烟气的收集,有效避免烟气从外层烟罩

逸散。

## 3 转炉烟气收集技术的开发及应用

根据转炉工艺特点和烟气流场的分析不难看出,铜冶炼转炉生产过程集烟系统的烟气收集效率是决定其烟气治理的关键。转炉烟气收集技术通过对集烟罩的优化设计和吹炼过程烟管负压的连锁调控,使吹炼过程的各个阶段烟气得到有效收集,最大限度解决转炉低空烟气逸散关键技术难题。

### 3.1 自抑结渣密封小车设计

转炉内层烟罩用的常规密封小车在摇炉过程中容易被炉口喷溅的高温熔体附着,一方面容易导致密封小车高温变形,另一方面熔体冷结后密封小车无法开关,影响密封小车的正常使用。因此,常规密封小车在摇炉过程中会随着炉体的转动向上限位滑动,避免炉口喷溅物对密封小车的冲击。摇炉过程随着密封小车的开启,大量烟气受炉内高压风的作用会从炉口逸散至烟道负压较低的外层烟罩,部分

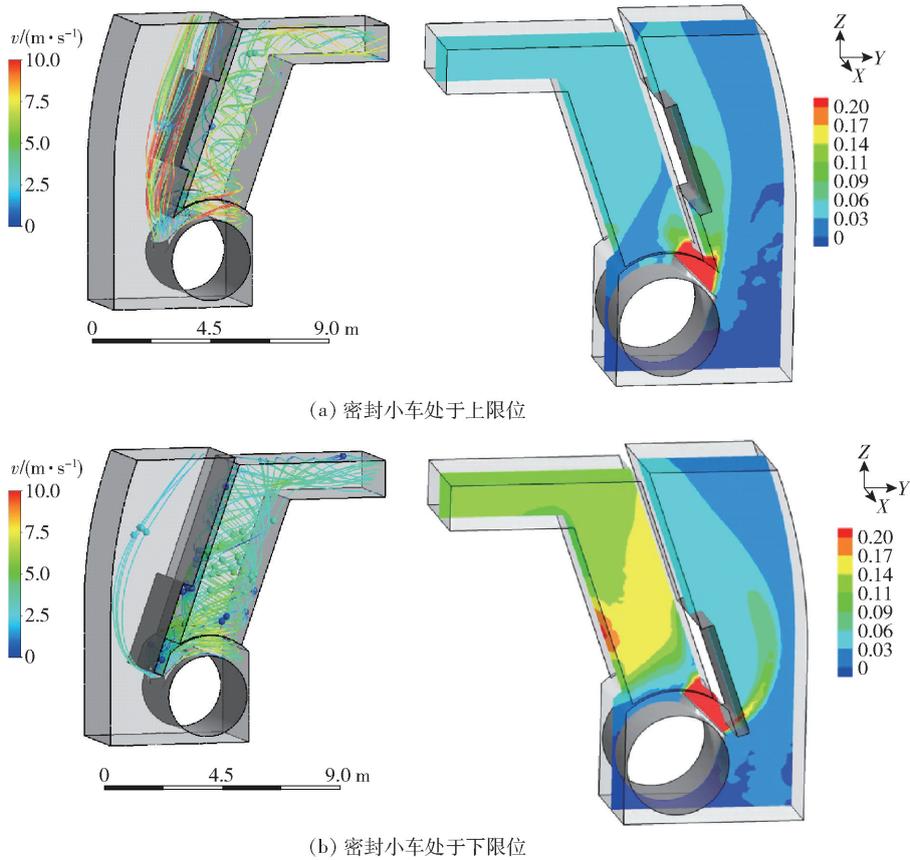
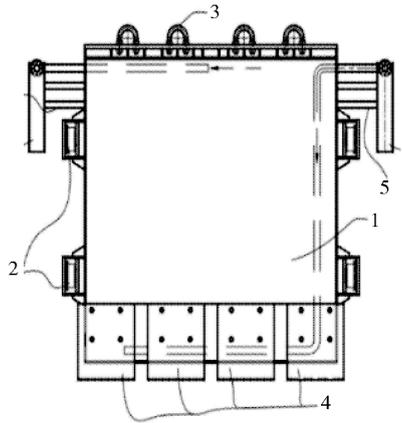


图 5 炉口位于 45°时的烟气流场

烟气会从外层烟罩漏风点逸散出。为了使密封小车在摇炉过程中保持在下限位,确保内层烟罩的高效密封,通过结构优化和材质选型,开发出一种具有自抑结渣功能的装置(如图 6 所示),不仅提高了密封小车的耐高温性,且炉口喷溅的高温熔体在结渣装置表面能快速冷脆脱落,使密封小车的性能得到提升。

### 3.2 集烟罩结构优化

由于环保烟道负压较低,逸散至转炉外层烟罩的烟气需要一定停留时间才能进入烟道,因逸散至外层烟罩的烟气具有一定流速,靠近炉口的烟气流速较高,烟罩密封性不好容易导致烟气逸散至烟罩外。此外,进料、放渣过程钢包暴露在烟罩外,烟罩收集范围过小,很难实现烟气的有效收集。采用活动挡烟门的外层烟罩设计方式,使摇炉过程逸散至外层烟罩的烟气有足够的停留时间。同时,进料和放渣过程钢包完全处于烟罩收集范围内,提升外层烟罩的收集能力。将挡烟门与炉窑设置联锁,摇炉过程保持外层烟罩关闭,炉体转动至进料位后自动



1. 车体 2. 滚轮 3. 驱动端连接耳 4. 防撞护板 5. 护板支架

图 6 自抑结渣密封小车结构示意图

打开,且烟罩向下延伸至炉体下方,在不影响进料的同时,扩大了烟罩的收集范围,如图 7 所示。

### 3.3 熔剂加入口烟气自动隔离装置

转炉吹炼造渣期需要分批次频繁加入熔剂,目前,熔剂采用溜槽方式从内层烟罩两侧开口加入,过程中烟气容易从加入口逸散至炉窑周围环境中,容易造成低空污染。为了使熔剂加入过程烟罩保持高

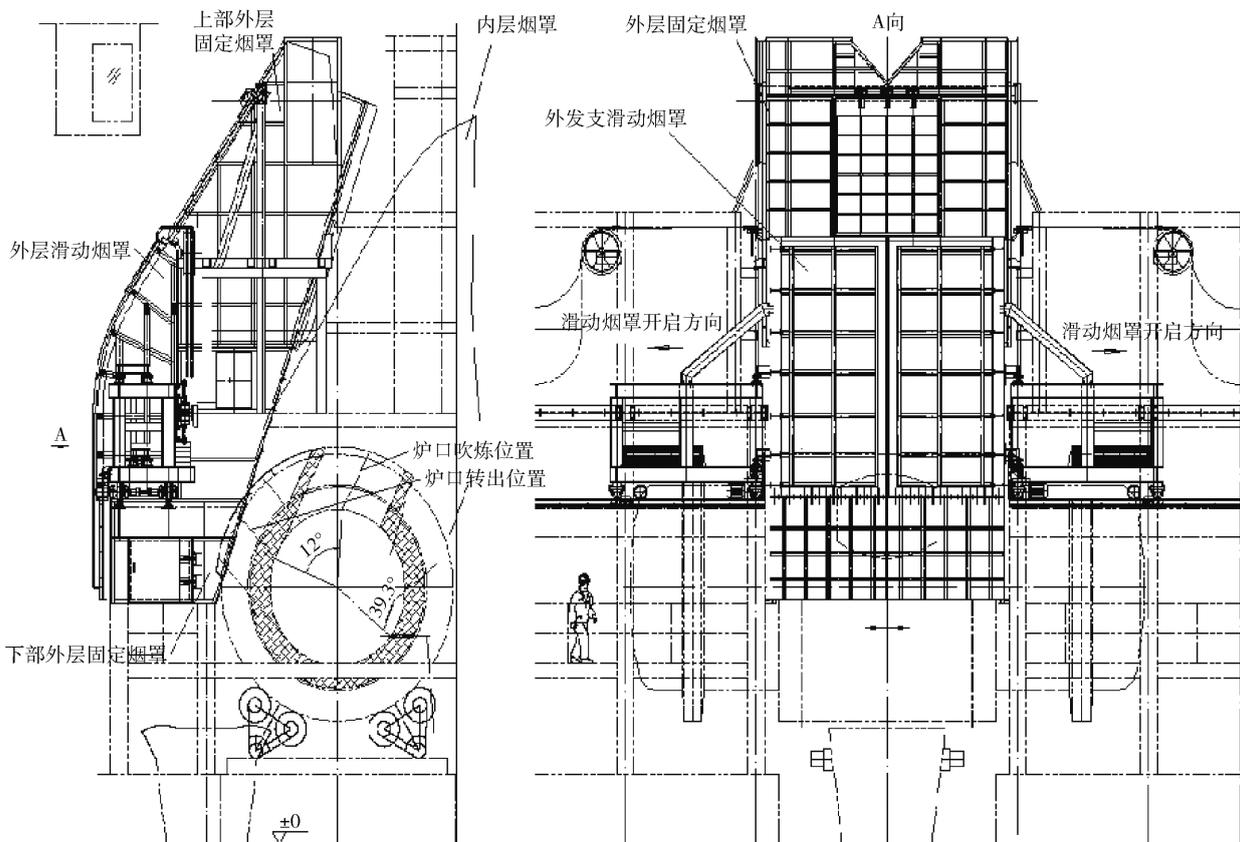


图7 活动挡烟门外层烟罩结构图

密封性,开发了一种烟气隔离装置,在溶剂加入口开启后,利用隔离装置在加入口周围形成阻力,将外逸烟气阻挡至烟罩,有效抑制熔剂加入过程的烟气逸散。同时,为了实现吹炼过程隔离装置的自动控制,匹配性开发了自动控制系统,在溶剂系统启动时,自动开启隔离装置,并能根据溜槽入口烟气情况自动调整隔离装置角度,最大限度防止加熔剂过程内层烟罩烟气的逸散。具体装置结构如图8所示。

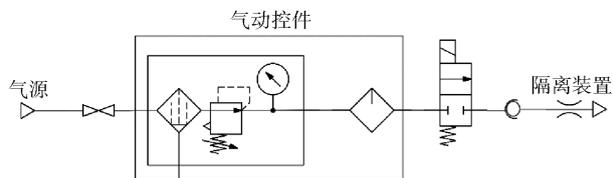


图8 熔剂加入口烟气自动隔离装置

### 3.4 生产实践结果

通过以上措施的实施,转炉吹炼过程低空逸散烟气得到了有效控制。图9是送风量 $32\ 000\ \text{Nm}^3/\text{h}$ ,主工艺烟道负压 $-400\ \text{Pa}$ ,环保烟道负压 $-100\ \text{Pa}$ 条件下,吹炼过程和摇炉过程烟气分布情况。从图

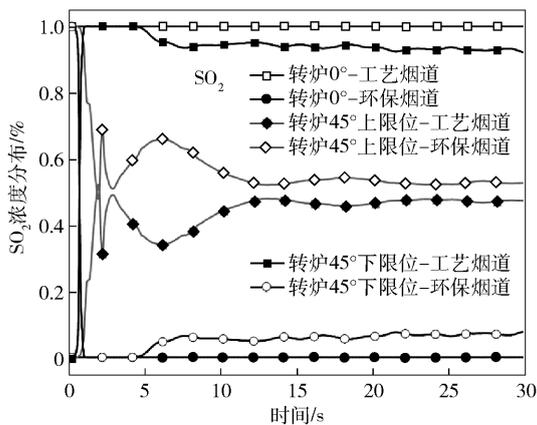


图9 烟气治理技术生产实践结果

中可以看出,采用高密封自抑结渣密封小车后,摇炉至 $45^\circ$ 时,由于密封小车保持下限位不动,烟气主要通过内层烟罩收集进入工艺烟道,逸散至外层烟罩收集的环保烟道烟气量明显降低。实践表明,工艺烟气中 $\text{SO}_2$ 含量增加约 $2.5\ \text{t/h}$ ,环集烟气中 $\text{SO}_2$ 含量减少约 $0.11\ \text{t/h}$ ,硫的捕集率提高约 $81.8\%$ 。同时,工艺烟气高效收集和环集烟气处理量的减少,每

年可增加硫酸产量约 1 031 t,可减少硫酸铵产量约 59 t,增加经济效益约 71.9 万元。转炉烟气收集技术的应用,从源头上解决了铜冶炼转炉吹炼低空烟气治理这一行业技术难题。

## 4 结论

1) 提高转炉摇炉、进料、放渣、加熔剂过程烟气的捕集能力是铜冶炼转炉吹炼工艺烟气治理技术的关键。

2) 采用新型自抑结渣密封小车可以有效抑制摇炉过程的烟气遗散,提高二氧化硫烟气的捕集能力,降低环集烟气治理压力。

3) 活动挡烟门烟罩结构优化和熔剂加入口风幕设计,可以有效控制集烟系统的收集能力,避免低空烟气逸散,提升转炉吹炼工艺的环保能力。

### [参考文献]

[1] 王斌. 铜冶炼环集烟气脱硫系统的改造实践[J]. 有色设备, 2022, 36(03): 55-58.

[2] 王森. 火法炼铜技术现状及发展趋势[J]. 江西建材, 2015(19): 284-285.

[3] 唐尊球. 论我国铜吹炼技术发展方向[J]. 有色冶炼, 2002(6): 6-8.

[4] 范进军. 金隆铜冶炼转炉生产实践[J]. 有色金属(冶炼部分), 2015(9): 26-29.

[5] 唐尊球. 铜 PS 转炉与闪速吹炼技术比较. [J]. 有色金属(冶炼部分), 2003(1): 9-11.

[6] 王满仓, 陈瑞英. “碳达峰、碳中和”对我国铜工业发展的影响[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(6): 1-4.

[7] 于海波, 刘大方, 杜昱初等. 新型炼铜转炉设计应用与实践[J]. 有色金属科学与工程, 2020, 11(6): 43-47.

[8] 贾龙. 铜转炉吹炼喷溅的危害及控制措施分析[J]. 世界有色金属, 2020(4): 4-5.

[9] 普宗祥. 转炉双层烟罩的特点及其设计[J]. 有色冶金设计与研究, 1997, 18(3): 43-47.

[10] 周俊. 铜冶炼工艺技术的进展与我国铜冶炼厂的技术升级[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(8): 1-10.

## Development and Application of Flue gas Collection System for Copper Smelting Converter

ZHU Peng-chun, YU Hai-bo<sup>\*</sup>, HE En, BAN Qing, ZHAO Si-gu

**Abstract:** Aiming at the difficult problem of low-level fugitive flue gas treatment in the process of converting and shaking, feeding, slag discharge and flux addition of copper smelting converter, through the analysis of process characteristics and the simulation of flue gas flow field, a new sealed car with the ability of self inhibiting slagging is developed, and the matching optimization design of the smoke collection system is carried out. The sulfur capture rate in the annular flue gas is increased by about 81.8%, and the environmental protection ability of copper smelting converter converting process is significantly improved.

**Key words:** copper; converting; flue gas collection

